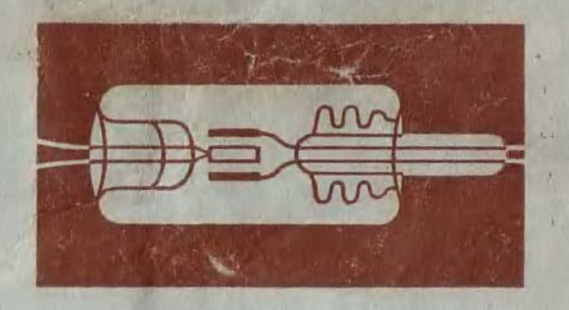
МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

Л. А. ГОНЧАРСКИЙ

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА С МЕХАНИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1956

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 243

Л. А. ГОНЧАРСКИЙ

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА С МЕХАНИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1956 ЛЕНИНГРАД

В брошюре дается обзор принципов, конструкций и применений электронных ламп с механически управляемыми электродами. Она рассчитана на подготовленного радиолюбителя, интересующегося применениями радиотехнических методов и электронных приборов в различных отраслях народного хозяйства.

Автор *Луи Абрамович Гончарский*

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА С МЕХАНИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Редактор *А. И. Фройман* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 3/II 1956 г. Подписано к печати 2/IV 1956 г.
Формат бумаги 84×108 1/32 2 п. л. Уч.-изд. л. 2,2
Т-02492 Тираж 15 000 Цена 90 к. Зак. № 1068

Типография Госэнергоиздата, Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое внедрение радиотехнических методов и электроники в различные отрасли народного хозяйства способствует созданию новых электронных приборов и аппаратуры, основанной на их использовании.

Сравнительно недавно были разработаны и начали применяться новые электронные лампы, управление которыми осуществляется путем перемещения подвижного электрода внутри лампы. Такие электронные лампы с механическим управлением оказались весьма чувствительными датчиками приборов для измерения сил, перемещений, температуры, влажности воздуха, потоков света, малых токов, зарядов и других механических и физических величин.

В разработке и использовании различной аппаратуры для народного хозяйства большое участие принимают и многие советские радиолюбители. Поэтому для них будет интересно познакомиться с новым типом электронных ламп с механическим управлением.

В данной брошюре описываются принципы работы, устройство и применение этих ламп.

Следует отметить, что успешное развитие электровакуумной технологии и широкое распространение вакуумного оборудования в промышленности, учебных и научных учреждений позволяют работающим в них радиолюбителям самостоятельно осуществлять наиболее простые из описываемых здесь механически управляемых электронных ламп.

Л. Гончарский

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

МЕХАНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМИ И ИОННЫМИ ТОКАМИ

Перед тем как перейти к описанию явлений, позволяющих осуществить эффективное механическое управление электронными и ионными токами ламп, выберем и определим основные параметры механически управляемых электронных ламп. Это дает возможность провести количественное сравнение работы отдельных систем ламп, что необходимо для объективной характеристики систем механически управляемых электронных ламп, действие которых основано на использовании различных явлений, позволяющих осуществить механическое воздействие на электронные и ионные токи ламп. Перед определением же параметров механически управляемых электронных ламп напомним для сравнения основные параметры ненагруженной электронной лампы обычного типа (внутреннее сопротивление, крутизну характеристики и коэффициент усиления).

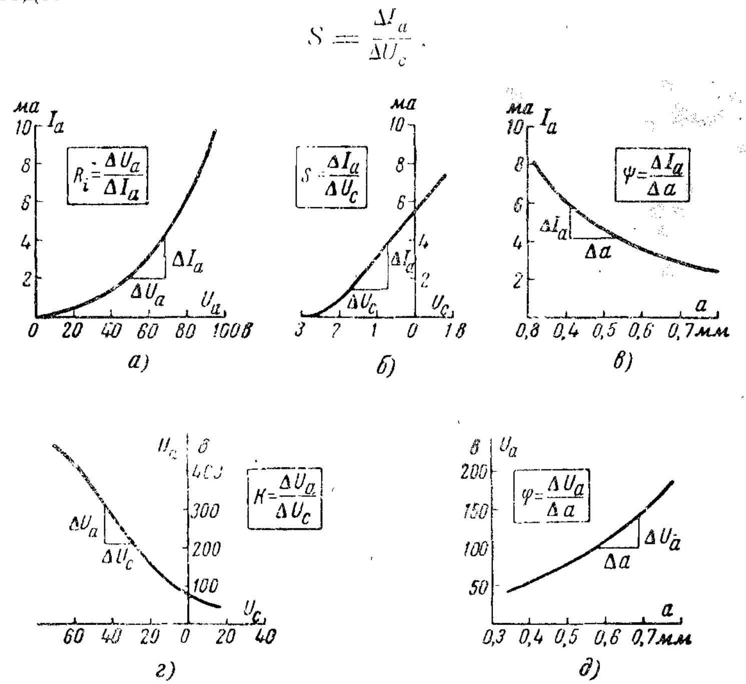
Электронные лампы, в том числе и механически управляемые электронные лампы, являются нелинейными проводниками, в которых ток изменяется не пропорционально приложенному к лампе напряжению, а по более сложной зависимости. Поэтому для подсчета элементов схем с электронными лампами часто пользуются величиной, носящей название «дифференциального внутреннего сопротивления», равного отношению приращения анодного напряжения к приращению анодного тока:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

(при определении дифференциального внутреннего сопротивления электронной лампы напряжения на остальных электродах остаются неизменными). На фиг. 1,*а* приведена анодная характеристика электронной лампы и показан способ определения значения R_i.

Крутизной S характеристики электронной лампы с управляющей сеткой называется отношение изменения анодного тока ΔI_a к вызвавшему его изменению напряжения на сетке ΔU_c при неизменном напряжении на аноде:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}.$$



Фиг. 1. Основные характеристики электронной лампы с механическим управлением.

а — анодная характеристика; *б* — сеточная характеристика; *в* — характеристика зависимости анодного тока от положения подвижного электрода; *г* — характеристика зависимости напряжения на аноде лампы от напряжения на ее сетке при постоянном анодном токе; *д* — характеристика зависимости напряжения на аноде лампы от положения ее подвижного электрода.

На фиг. 1,*б* приведена характеристика зависимости анодного тока от напряжения на сетке лампы и показан способ определения крутизны характеристики.

Анодный ток механически управляемой электронной лампы регулируется перемещением подвижного электрода, поэтому для описания характера изменения анодного тока лампы под действием механического процесса пользуются крутизной характеристики зависимости анодного тока механически управляемой электронной лампы от положения подвижного электрода. Эта величина называется чувствительностью механически управляемой электронной лампы по току (к перемещениям подвижного электрода). Под чувствительностью механически управляемой электронной лампы по току ψ понимается отношение приращения анодного тока ΔI_a к вызвавшему его изменению положения (перемещению) подвижного электрода Δa при неизменных напряжениях на электродах лампы:

$$\psi = \frac{\Delta I_a}{\Delta a}.$$

На фиг. 1,*в* приведена характеристика зависимости анодного тока лампы от положения подвижного электрода и показан способ определения значения чувствительности по току механически управляемой электронной лампы.

Под коэффициентом усиления электронной лампы понимается величина, показывающая, во сколько раз изменение напряжения на сетке лампы действует сильнее изменения напряжения на ее аноде. Значение коэффициента усиления K электронной лампы определяется отношением приращения напряжения на аноде лампы ΔU_a к вызвавшему его приращению напряжения на сетке ΔU_c при постоянном анодном токе:

$$K = -\frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

На фиг. 1,*г* приведена характеристика зависимости напряжения на аноде электронной лампы от напряжения на ее сетке при постоянном анодном токе и показан способ определения коэффициента усиления электронной лампы.

Напряжение на аноде механически управляемой электронной лампы регулируется перемещением подвижного электрода, поэтому для описания характера изменения напряжения на аноде под действием механического процесса пользуются величиной, называемой чувствительностью механически управляемой электронной лампы по напряжению φ, под которой понимается отношение приращения напряжения на аноде лампы ΔU_a к вызвавшему его перемещению Δa подвижного электрода при неизменном анодном токе:

$$\varphi = \frac{\Delta U_a}{\Delta a}.$$

На фиг. 1,*д* приведена характеристика зависимости напряжения на аноде механически управляемой электронной лампы от положения подвижного электрода при неизменном анодном токе лампы и показан способ определения чувствительности механически управляемой электронной лампы по напряжению.

Приведенные выше параметры являются статическими, характеризующими ненагруженную электронную лампу. Статическими они называются в отличие от динамических параметров, характеризующих свойства электронных ламп, в том числе и электронных датчиков, работающих на нагрузку.

Определив основные параметры ламп с механическим управлением (дифференциальное внутреннее сопротивление R_i, чувствительность по току ψ и чувствительность по напряжению φ), можно перейти к рассмотрению различных способов механического управления током электронной лампы.

Продольное управление

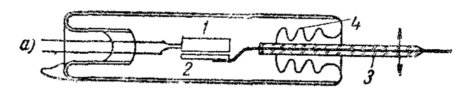
При продольном управлении подвижной электрод механически управляемой электронной лампы перемещается в направлении электрического поля между электродами лампы. Такой способ механического управления током электронной лампы был предложен автором в 1935 г.

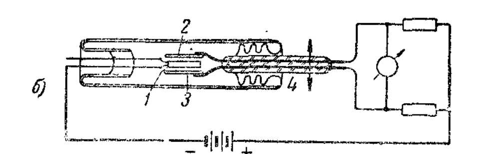
Схематическое устройство механически управляемой двухэлектродной лампы продольного управления показано на фиг. 2,*а*. Эта лампа имеет неподвижный плоский подогревный катод *1* и плоский подвижной анод *2*, укрепленный на стержне *3*, который может качаться в эластичном сильфоне *4*, впаянном в стенку баллона лампы. Оба электрода располагаются параллельно друг другу. Изменение расстояния между электродами при постоянном напряжении на них сопровождается изменением напряженности электрического поля между ними. Так, при сближении электродов напряженность электрического поля между электродами увеличивается и анодный ток нарастает и, наоборот, с удалением анода напряженность электрического поля уменьшается и соответственно падает анодный ток лампы. Внешний конец стержня *3* сочленяется с контролируемым телом, изменение геометрических размеров которого измеряется при помощи электронного датчика.

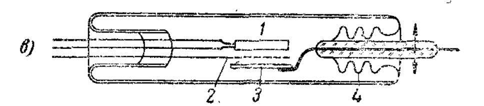
Перемещения подвижного анода оказываются малыми по сравнению с размерами подвижного стержня, и это позволяет считать, что подвижной электрод лампы во время ее работы движется в продольном направлении. Тогда чувствительность датчика по току ψ оказывается равной:

$$\psi = \frac{2 \cdot A \cdot S \cdot U_a^{3/2}}{a^3},$$

где $A = 2{,}34 \cdot 10^{-6}$;
S — активная поверхность накаленного катода, *см*²;
U_a — напряжение на аноде лампы, *в*;
a — расстояние между электродами, *см*.







Фиг. 2. Лампы продольного управления.

а — устройство двухэлектродной лампы с подвижным анодом; *б* — устройство двуханодной лампы и схема ее включения; *в* — устройство трехэлектродной лампы с подвижным анодом.

Чувствительность диодного датчика по току при известном анодном токе I_a и расстоянии между электродами a может быть подсчитана по формуле

$$\psi = \frac{2 \cdot I_a}{a},$$

а чувствительность его по напряжению — по формуле

$$\varphi = \frac{4 \cdot U_a}{3 \cdot a}.$$

Существенными достоинствами описанного выше диодного датчика являются малое внутреннее сопротивление, значительный анодный ток при относительно невысоких анодных напряжениях и высокая чувствительность по току, доходящая до 100 *ма* на миллиметр смещения анода.

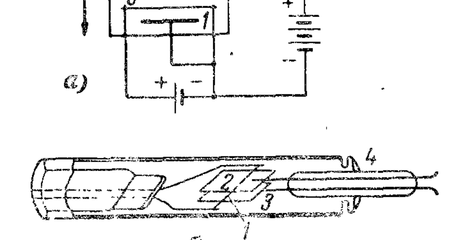
В измерительных схемах пользуются преимущественно двуханодными диодными датчиками, работающими в мостовых и других симметричных схемах. Схематическое устройство такого датчика показано на фиг. 2,*б*. В нем по обе стороны неподвижного катода *1* находятся аноды *2* и *3*, укрепленные на стержне *4*. При качаниях стержня *4* в направлении, показанном стрелкой, один анод приближается к катоду, а другой удаляется от него. В результате этого изменяется соотношение электронных токов на аноды датчика; ток на приближающийся анод нарастает в то время, когда ток на удаляющийся анод падает. На той же фиг. 2,*б* показана мостовая схема включения двуханодного диодного датчика, в диагонали которой включен стрелочный микроамперметр. Это типичная схема электронного микрометра, позволяющего производить отсчет малых линейных размеров, порядка десятых и даже сотых долей микрона по стрелочному микроамперметру.

Диодные электронные датчики, изготовляемые в настоящее время, имеют обычно высокую чувствительность по току при относительно небольшой чувствительности по напряжению. Их применяют для непосредственной работы на регистрирующие и исполнительные устройства сравнительно невысокого внутреннего сопротивления (электромагнитные осциллографы и реле), а также в мостовых измерительных схемах со стрелочными техническими микроамперметрами в качестве отсчетных устройств.

Продольное управление используется и в триодных электронных датчиках. На фиг. 2,*в* показано устройство триодного датчика продольного управления с подвижным анодом. В этой лампе неподвижными электродами являются накаленный катод *1* и плоская сетка *2*, а подвижной анод *3* укреплен на стержне, проходящем сквозь эластичный сильфон *4*. К наиболее известным приборам этого типа относится вибротрон (см. стр. 24), особенностью которого является коническая форма анода, позволяющая значительно снизить момент инерции и тем самым значительно улучшить частотную характеристику датчика. В вибротроне используется подогревный катод. Сетка вибротрона при работе обычно соединяется с его катодом.

Зондовое управление

Действие электронных датчиков зондового управления основано на перемещении в электрическом поле тонкого накаленного катода непосредственного накала. Схема электронного датчика этого типа показана на фиг. 3,*а*. Между плоскими электродами *1* и *2* находится параллельный им тонкий катод непосредственного накала *3*. Электроды *1* и *2* присоединены к анодной батарее. Во время работы датчика катод *3* перемещается в направлении, показанном стрелкой, оставаясь параллельным остальным электродам лампы. Анодный ток электронной лампы зондового управления оказывается резко выраженной функцией положения накаленного катода относительно электродов *1* и *2*. Перемещение катода в направлении электрода *2* сопровождается быстрым нарастанием анодного тока датчика.



Фиг. 3. Лампа зондового управления.
а — схема включения лампы; *б* — устройство лампы.

На фиг. 3,*б* показано устройство электронного датчика зондового управления, в котором перемещение накаленного катода (относительно электродов, создающих электрическое поле, в котором находится зонд) заменено перемещением относительно него электродов *2* и *3*, укрепленных на стеклянном стержне, который может качаться в стеклянном сильфоне *4*. Представляет интерес система электронного датчика зондового управления, в котором подвижным является только один из внешних электродов. Такая система оказывается особенно удобной для электронных датчиков, предназначенных для контроля быстропротекающих динамических процессов.

Ценной особенностью электронных датчиков зондового управления является их высокая чувствительность по напряжению, реализуемая при малой мощности, рассеиваемой в цепи накала электронной лампы. Чувствительность по напряжению электронного датчика зондового управления,

соответствующего схеме фиг. 3,*а*, может быть подсчитана по формуле

$$\varphi = \frac{U_a}{a},$$

где U_a — напряжение на аноде (электроде *2*), *в*;

a — расстояние между накаленным катодом *3* и холодным катодом (электродом *1*), *см*.

Если, например, $U_a = 300$ *в* и $a = 0{,}05$ *см*, то

$$\varphi = \frac{300}{0{,}05} = 6\,000 \text{ в/см},$$

что соответствует чувствительности по напряжению 0,6 *в* на микрон.

Используя в упомянутой выше системе одностороннего управления холодный катод цилиндрической или конической формы, можно значительно повысить чувствительность по напряжению электронного датчика зондового управления.

Чувствительность по току датчиков зондового управления, устройство которых показано на фиг. 3, *а*, может быть подсчитана по формуле

$$\psi = \frac{3 \cdot I_a}{2 \cdot a},$$

где I_a — анодный ток, *ма*;

a — расстояние между накаленным и холодным катодами, *см*.

Подсчитаем для примера чувствительность по току зондового датчика.

Если, например, $I_a = 10$ *ма* и $a = 0{,}05$ *см*, то

$$\psi = \frac{3 \cdot 10}{2 \cdot 0{,}05} = 300 \text{ ма/см},$$

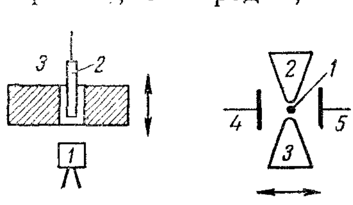
что соответствует чувствительности по току 30 *мка* на микрон перемещения подвижного электрода.

При осуществлении электронных датчиков одностороннего зондового управления оказывается существенным выбор полярности подвижного электрода. Так, в датчиках повышенной чувствительности по напряжению оказывается целесообразным использовать подвижной электрод в качестве холодного катода, а в датчиках повышенной чувствительности по току подвижной электрод должен быть анодом.

Дифференциальное управление

Действие электронных датчиков дифференциального управления основано на том, что управляющий электрод скользит в щели второго электрода, нейтрализующего его действие.

Принципиальное устройство датчика этого типа показано на фиг. 4,*а*. Он состоит из накаленного катода *1* и сквозных электродов *2* и *3*. В последнем, являющемся холодным катодом, имеется щелевидное отверстие, вдоль которого свободно, не касаясь краев щели, перемещается по направлению, показанному стрелкой, электрод *2*, являющийся анодом. Пока анод датчика *2* остается утопленным в щели холодного катода *3*, экранирующего от его действия накаленный катод *1*, анодный ток датчика отсутствует. При перемещении анода в сторону катода *1* экранирующее действие холодного катода постепенно ослабляется. В результате этого появляется анодный ток, быстро нарастающий при дальнейшем перемещении анода.



Фиг. 4. Лампы дифференциального управления.

а — схема одноанодного датчика; *б* — схема двуханодного датчика.

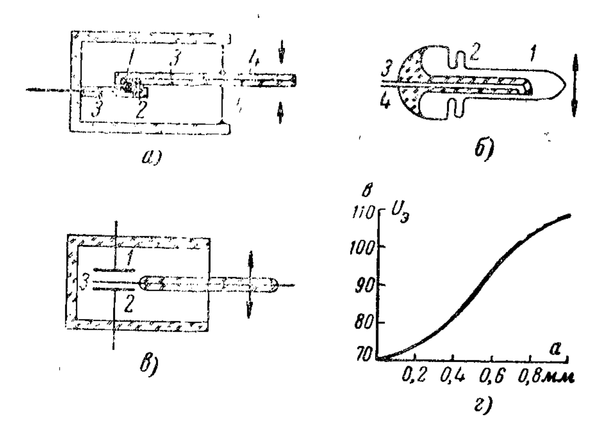
На фиг. 4,*б* показана схема устройства двуханодного датчика дифференциального управления с подвижным катодом *1* непосредственного накала. Последний может перемещаться по направлению, показанному стрелкой, в щели холодного катода, состоящего из двух частей *2* и *3*. При перемещении накаленного катода меняется распределение электронного тока между анодами *4* и *5*. Этот датчик может работать на мостовую схему, два плеча которой образуются обеими половинами сдвоенного датчика.

Ионные датчики тлеющего разряда

Ионные датчики механических величин представляют собой газоразрядные приборы, действие которых основано на использовании зависимости режима газового разряда от геометрии системы электродов ионной лампы. Механически управляемые ионные лампы могут быть с холодным и с накаленным катодом. По режиму работы они разделяются на датчики непрерывного разряда и датчики импульс-

ного разряда. К датчикам непрерывного разряда относятся, в частности, описываемые ниже датчики тлеющего разряда. В последних используются продольный, поперечный и зондовый способы механического управления тлеющим разрядом.

Устройство датчика тлеющего разряда продольного управления показано на фиг. 5,*а*. Он состоит из подвижного *1* и неподвижного *2* электродов, находящихся внутри баллона датчика, наполненного разреженным газом. Тлеющий разряд происходит между ближайшими поверхностями электродов, так как боковые поверхности электродов покрыты слоем стекла *3*. Подвижной электрод укреплен на стержне *4*, который может качаться в эластичной мембране *5* в направлении, показанном стрелками. Перемещения стержня *4* сопровождаются изменениями расстояния между электродами датчика.



Фиг. 5. Ионные лампы тлеющего разряда.

а — устройство датчика продольного управления; *б* — устройство портативного датчика поперечного управления; *в* — устройство датчика зондового управления; *г* — характеристика зависимости напряжения зонда от его положения.

Действие датчика тлеющего разряда поперечного управления основано на том, что тлеющий разряд между электродами проходит сквозь щель, одна стенка которой неподвижная, а другая подвижная. Сужение щели, в которой происходит тлеющий разряд между электродами, усиливает рекомбинацию ионов на стенках щели и повышает тем самым падение напряжения на газоразрядном датчике. На фиг. 5,*б* показано устройство портативного датчика тлеющего разряда поперечного управления, в котором роль подвижного элемента играет трубчатая часть *1* баллона датчика, сочлененная при помощи сильфона *2* с остальной частью датчика. Электроды датчика *3* и *4*, между которыми происходит тлеющий разряд, впаяны в ножку прибора.

Устройство датчика тлеющего разряда зондового управления показано на фиг. 5,*в*. Он состоит из неподвижных плоских электродов *1* и *2*, между которыми находится прямой тонкий электрод *3*, расположенный параллельно первым электродам. Электрод *3* может перемещаться в направлении, показанном стрелкой, оставаясь приблизительно параллельным электродам *1* и *2*. При работе датчика между его электродами *1* и *2* поддерживается тлеющий разряд. При перемещении электрода *3* в направлении, показанном стрелкой, меняется его потенциал относительно электрода *1*. Тонкий электрод, используемый в качестве зонда, может быть заменен плоской сеткой, параллельной электродам *1* и *2*.

На фиг. 5,*г* приведена характеристика зависимости напряжения $U_з$ зонда относительно катода от положения *а* подвижного электрода (зонда).

Ионные датчики импульсного разряда

Ионные импульсные датчики механических величин могут быть с холодными и накаленными катодами. Конструктивное оформление импульсного датчика с холодным катодом аналогично оформлению датчика тлеющего разряда. Действие его основано на использовании зависимости напряжения зажигания разряда в газоразрядном приборе от расстояния между электродами. Изменение геометрии разрядного промежутка в результате перемещения подвижного элемента датчика приводит к изменению напряжения зажигания разряда. Подобрав давление газа внутри прибора, можно получить датчик импульсного разряда, обладающий высокой чувствительностью по напряжению. Эти датчики имеют определенную практическую ценность, однако значительно больший интерес представляют ионные импульсные датчики с накаленным катодом, являющиеся механически управляемыми тиратронами.

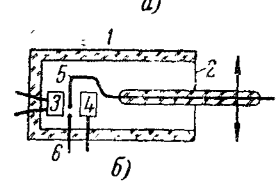
Основным параметром, определяющим регулирующее действие сетки тиратрона, является величина, называемая коэффициентом управления *К* тиратрона, которая равна отношению напряжения на аноде тиратрона к тому значению

напряжения на его сетке, при котором прекращается запирающее действие сетки:

$$K = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

При известном значении коэффициента управления K нетрудно подсчитать по заданному анодному напряжению напряжение на сетке, при котором начинается разряд в тиратроне, и, наоборот, по заданному запирающему напряжению на сетке подсчитать анодное напряжение, необходимое для возникновения дугового разряда в тиратроне.

Характеристика зависимости анодного напряжения от напряжения на сетке тиратрона, при котором начинается разряд, показана на фиг. 6,*а*.



Фиг. 6. Ионные лампы импульсного разряда.

а — характеристика зависимости анодного напряжения от напряжения на сетке, при котором начинается разряд в тиратроне; *б* — устройство механически управляемого тиратрона.

Действие механически управляемого тиратрона основано на изменении коэффициента управления в результате перемещения подвижного электрода. На фиг. 6,*б* показано принципиальное устройство одного из механически управляемых тиратронов. Внутри баллона *1*, имеющего эластичную стенку *2*, в атмосфере разреженного газа находятся накаленный катод *3*, анод *4* и сетка, состоящая из подвижной *5* и неподвижной *6* частей, образующих регулируемую щель. При раздвижении обеих частей сетки, сопровождающемся увеличением ширины щели, коэффициент управления тиратрона уменьшается и, наоборот, сближение этих частей приводит к возрастанию коэффициента управления тиратрона. Реализуемая в механически управляемом тиратроне возможность непосредственного регулирования коэффициента управления тиратрона за счет перемещения подвижного электрода позволяет по-новому подойти к осуществлению регулирующих устройств, основанных на использовании тиратронов, создавая возможность управлять режимами их работы при сохранении неизменными напряжений на электродах тиратрона.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ВАЖНЕЙШИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

Электронные датчики отличаются высокой чувствительностью к перемещению подвижного управляющего электрода. Эта особенность позволяет использовать их не только для измерения линейных размеров тел с высокой точностью, но и применить для контроля деформаций воспринимающих элементов приборов, служащих для измерения ряда физических величин. В результате использования электронного датчика малых перемещений вместо других систем обнаружения и измерения малых смещений чувствительного элемента измерительных приборов можно значительно повысить чувствительность многих из этих устройств, а так же упростить конструкцию и значительно повысить надежность экспериментальной производственной и измерительной контрольной аппаратуры.

Во многих случаях использование электронных датчиков сводится к замене в типовом измерительном устройстве ранее применяющегося датчика деформаций прежнего чувствительного элемента на электронный датчик. В других случаях приходится заново конструировать систему электронного датчика, предназначенного для контроля измеряемой величины (например, в электронном датчике ускорений с внутренней инертной массой). Ниже мы опишем некоторые системы специализированных электронных датчиков, а также отметим отдельные способы использования электронных датчиков установившихся типов в качестве чувствительного элемента существующих типов измерительных установок. Вместе с тем мы покажем возможность значительного повышения чувствительности подобных устройств.

Подчеркивая целесообразность использования электронных датчиков в ряде устройств для измерения физических величин, следует одновременно отметить, что в ряде других случаев эти датчики уступают известным прежде. Так, например, при статических измерениях механических напряжений в деталях машин замена электронными датчиками проволочных датчиков сопротивления оказывается не всегда целесообразной. Каждый тип датчиков является специализированным прибором, пригодным для наиболее эффективного использования в определенном круге измерительных устройств. Мы отметили это в связи с тем, что опыт успешного использования электронных датчиков в различ-

ной измерительной аппаратуре привел к довольно многочисленным попыткам использовать их и в таких устройствах, где это не имеет смысла.

Обратимся теперь к рассмотрению некоторых устройств, в которых механически управляемые электронные лампы используются в качестве датчиков как механических, так и немеханических величин, а также в качестве регуляторов тока и напряжения некоторых электрических цепей.

Электронные измерители линейных размеров

Высокая чувствительность механически управляемых электронных ламп к смещению подвижного электрода позволяет применить их в качестве чувствительных датчиков различной измерительной аппаратуры, используемой для контроля геометрических размеров различных тел. Наиболее известными устройствами этого типа являются электронные микрометры.

Обычно в электронных микрометрах применяются двуханодные диодные датчики, работающие в симметричной мостовой схеме (фиг. 2,*б*). Подсчитаем для примера чувствительность такого микрометра, полагая, что в качестве датчика использована электронная лампа с чувствительностью по току ψ, равной 0,2 *а/см*, что соответствует чувствительности 20 *ма* на 1 *мм*. Сопротивления *R*, включенные в плечи моста, полагаем равными внутреннему сопротивлению датчика и сопротивлению гальванометра. Цену деления $\nu_г$ последнего полагаем равной 1 *мка*. Цена деления электронного микрометра ν_i для рассматриваемого случая подсчитывается по формуле

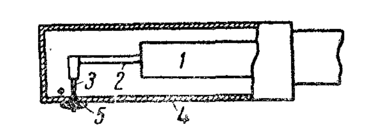
$$\nu_i = \frac{2 \cdot \nu_г}{\psi}.$$

Подставляя в нее указанные выше значения параметров, получим:

$$\nu_i = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,2} = 10^{-5}\ см = 0,1\ мкн.$$

Следовательно, при использовании в электронном микрометре датчика сравнительно небольшой чувствительности по току и стрелочного технического микроамперметра можно получить чувствительность в одну десятую микрона на деление. Приведенный пример наглядно показывает возможность осуществления высокочувствительных электронных микрометров, пригодных для использования в производственных условиях.

Опыт успешного применения электронных датчиков для визуального измерения линейных размеров был использован при их применении для регистрации изменений размеров контролируемых тел под действием изменения температуры, электрических и магнитных полей, сил и других факторов. Высокая чувствительность электронных датчиков позволяет в ряде типов таких регистрирующих устройств отказаться от дополнительного усиления сигналов, генерируемых датчиками, и подключать их непосредственно к электромагнитному или электронному осциллографу. Интересной особенностью электронных датчиков является относительно малое мерительное усилие, необходимое для перемещения подвижного электрода, которое определяется только жесткостью кинематической системы механически управляемой электронной лампы. Благодаря этому оказалось возможным использовать электронные микрометры для измерений деформаций тел, наблюдающихся при исследовании явлений, связанных с действием сравнительно небольших сил.



Фиг. 7. Устройство электронного датчика для измерения микрорельефа.

Значительная мощность сигнала электронных датчиков при высокой чувствительности их к малым перемещениям подвижного электрода стимулирует их использование в устройствах для автоматического контроля изделий по их линейным размерам в производственных условиях и, в частности, на автоматических линиях. Электронные микрометры целесообразно использовать также и для контроля размеров деталей в процессе их изготовления, например, на шлифовальных станках. Здесь оказываются особенно удобными малые мерительные усилия, необходимые для работы электронного микрометра.

Среди электронных измерителей линейных размеров в последние годы вновь привлекли внимание электронные анализаторы микрорельефа поверхности. Опыт успешного применения этих устройств показал их существенные преимущества перед другими системами электрических анализаторов микрогеометрии обработанной поверхности готовых изделий и деталей изготовляемых машин.

Электронный датчик микрорельефа, схематическое устройство которого показано на фиг. 7, представляет собой электронный датчик *1*, на подвижном стержне *2* кото-

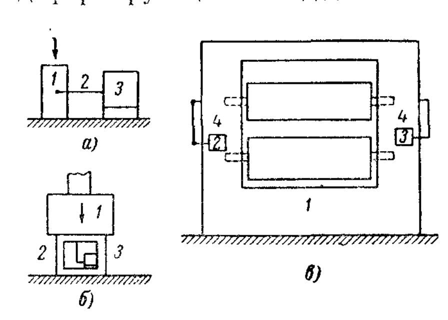
рого прикреплена ощупывающая игла *3*. На корпусе *4* прибора имеется опорная пята *5*, которой датчик опирается на контролируемую поверхность.

Основными преимуществами электронных датчиков микрорельефа являются малое мерительное усилие, равномерная чувствительность во всем диапазоне звуковых частот, а также высокая чувствительность. Все это позволяет значительно упростить измерительную схему по сравнению с другими известными электрическими схемами электрических анализаторов микрорельефа.

Следует отметить, что описанный датчик является одновременно и высокочувствительным звукоснимателем, позволяющим воспроизводить механическую звукозапись. Высокая чувствительность электронных звукоснимателей открывает перспективы создания устройств, непосредственно работающих на маломощный громкоговоритель (без усиления сигнала датчика).

Электронные измерители сил

Принципиальное устройство электронного измерителя сил показано на фиг. 8,*а*. Он состоит из эластичного тела *1*, деформирующегося под действием силы, направление которой показано стрелкой. С телом *1* сочленен подвижной стержень *2* электронного датчика *3* малых перемещений, служащего для измерения деформаций под действием измеряемой силы.



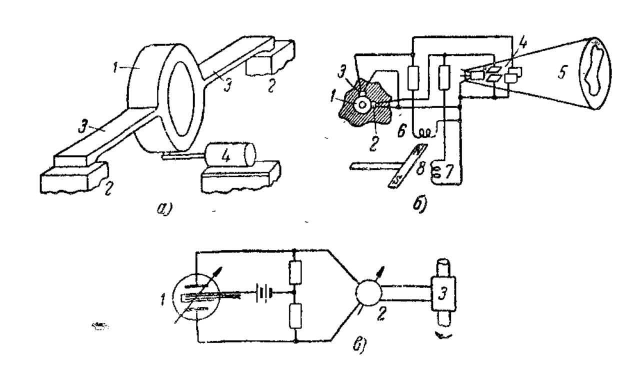
Фиг. 8. Электронные приборы для измерения механических сил.

а — схема электронного динамометра; *б* — схема динамометра для измерения сжатия; *в* — схема измерения усилий в прокатном стане.

На фиг. 8,*б* показана схема устройства динамометра для измерения силы давления пресса *1*. Датчик давления состоит из стальной рамки *2*, внутри которой находится электронный датчик *3*, служащий для измерения деформаций рамки, пропорциональных измеряемой силе.

Можно использовать упругие деформации, возникающие в деталях станков, измеряемые при помощи электронных датчиков для определения действующих в них сил. На фиг. 8,*в* показана примерная схема для регистрации давлений на валки прокатного стана по упругим деформациям его станины *1*, измеряемым датчиками *2* и *3*, установленными на стойках *4*. Суммируя сигналы обоих датчиков, можно получить токи для осциллографа, фиксирующего давления на валки стана.

На фиг. 9,*а* показана схема измерителя силы, действующей на подшипник *1*, укрепленный на опорах *2* при помощи стержней *3*, и измеряемой электронным датчиком *4*.

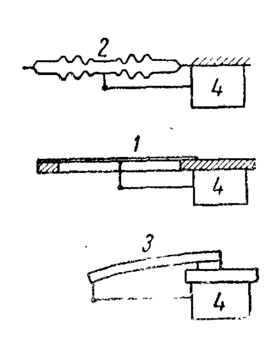


Фиг. 9. Измерители сил.

а — схема прибора для измерения усилия, действующего на подшипник; *б* — схема установки для наблюдения реакции вращающейся детали на подшипник; *в* — схема измерителя мощности на валу двигателя.

Еще одним примером измерительного устройства подобного типа является установка для непосредственного наблюдения на экране электронного осциллографа полярной диаграммы реакции на подшипники вращающейся детали механизма при работе последнего, показанная на фиг. 9,*б*. Под каждый из подшипников *1*, в которых вращается испытуемая деталь, в двух взаимно перпендикулярных направлениях устанавливают электронные динамометры *2* и *3*. Сигналы, генерируемые последними, подаются на отклоняющие электроды *4* электроннолучевой трубки *5* осциллографа. На те же электроды электроннолучевой трубки подаются переменные напряжения, сдвинутые по фазе на 90°, генерируемые в катушках *6* и *7* вращающимся постоянным магнитом *8*, укрепленным на оси, соединенной с вращающейся деталью. Такая схема позволяет наблюдать полярную диаграмму усилий, действующих на подшипники.

Схема для непосредственного измерения мощности, развиваемой работающей машиной на ее валу, показана на фиг. 9,*в*. Электронный датчик *1*, укрепленный на валу испытуемого двигателя, используется для измерения его закручивания (пропорционального крутящему моменту, приложенному к валу). Произведение крутящего момента на скорость вращения вала оказывается прямо пропорциональным мощности, развиваемой двигателем. Ток разбаланса моста, в который включен датчик, измеряющий крутящий момент, пропорциональный последнему, поступает в одну катушку ваттметра *2*. Во вторую катушку ваттметра направляется ток от датчика *3* электрического тахометра (ток последнего пропорционален скорости вращения вала). Мощность, развиваемая испытуемой или работающей машиной, отсчитывается непосредственно по ваттметру, отградуированному в единицах мощности.



Фиг. 10. Схемы электронных манометров.

Другим типом электронных приборов для измерения сил являются электронные манометры, осуществляемые по двум конструктивным схемам. В основу одной из них положено измерение электронным датчиком деформации упругого тела под действием измеряемого давления. На фиг. 10 показано несколько принципиальных схем манометров этого типа, в которых приемниками давления служат эластичная мембрана *1*, коробочка Види *2* или трубка Бурдона *3*, а устройством для измерения их деформации — электронный датчик малых перемещений *4*.

В электронных манометрах второго типа устройством для измерения давления служит эластичная стенка датчика, оформленная в виде мембраны наружного или внутреннего сильфона. Управляющий электрод датчика либо прикрепляется непосредственно к эластичному участку стенки баллона лампы, либо сочленяется с ним кинематически. Эластичная стенка, выполненная из металла, сама может служить электродом датчика.

Существенный практический интерес представляет использование электронных манометров для регистрации динамических процессов. В частности, оказывается целесообразным использование электронных манометров для регистрации давлений внутри цилиндров двигателей внутреннего сгорания и паровой машины, позволяющее значительно упростить экспериментальное изучение режимов работы двигателей. Обусловлено это тем, что высокая чувствительность электронных датчиков позволяет включать их непосредственно на осциллограф, не прибегая к усилению даваемых ими сигналов. Возможно также использование электронных манометров для контроля и регулирования производственных процессов по характеру хода динамических давлений внутри действующего оборудования.

Высокая чувствительность электронных датчиков малых перемещений позволила использовать их для осуществления электронных микрофонов, не уступающих по чувствительности угольным микрофонам, а по низкому уровню шумов — конденсаторным и электродинамическим микрофонам.

Электронные измерители ускорений и вибраций

Электронные датчики ускорений являются в настоящее время наиболее широко используемыми механически управляемыми электронными лампами. Они применяются для исследования ускорений, возникающих в работающих машинах, движущихся механизмах, используемых на транспорте, а также для измерений вибраций и действия ударных нагрузок. Их применяют также для контроля работы изготовленных машин и их отдельных деталей, в частности их балансировки, для автоматического контроля качества изготовленных изделий и для регулирования процесса доводки параметров деталей на автоматических линиях.

Действие электронных датчиков ускорений основано на измерении деформации упругого тела под действием тяжелого тела, подвергающегося контролируемому ускорению. При ускоренном движении датчика сила, действующая на его эластичную опору,

$$F = m \cdot w,$$

где m — масса тяжелого тела;
w — ускорение.

Под воздействием силы F эластичная опора деформируется и тяжелое тело оказывается смещенным. Смещение

$$a = k \cdot F,$$

где k — коэффициент упругости эластичной опоры.

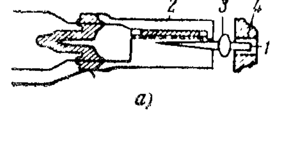
Следовательно, смещение тяжелого тела

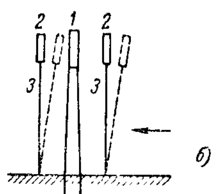
$$a = k \cdot m \cdot w,$$

а измеряемое ускорение

$$w = \frac{a}{k \cdot m}.$$

Отсюда видно, что смещение тяжелого тела оказывается прямо пропорциональным измеряемому ускорению. Следовательно, измеряя смещение тяжелого тела под действием ускорения, мы получим возможность непосредственно измерить ускорение, действующее на датчик.





Фиг. 11. Электронные приборы для измерения ускорений.

а — устройство электронного датчика ускорений с вибротроном; *б* — схема электронного прибора для измерения ускорений с внутренней инертной массой.

По расположению тяжелого тела относительно системы электродов лампы электронные датчики ускорений делятся на датчики с внешней и датчики с внутренней инертной массой.

В датчиках с внешней инертной массой тяжелое тело, смещающееся под действием ускорений, находится вне механически управляемой электронной лампы. Такие датчики удобны тем, что для их осуществления не требуется выполнения работ по изготовлению самой электронной лампы, так как чувствительным элементом датчика служит типовой электронный датчик малых перемещений. На фиг. 11,*а* показано устройство электронного датчика ускорений с вибротроном в качестве чувствительного элемента. На подвижном стержне *1* вибротрона *2* укреплена гайка *3*, служащая инертной массой датчика. Капилляр *4*, внутри канала которого находится конец подвижного стержня *1*, служит ограничителем перемещений последнего. Между стенками канала капилляра и стержнем находится небольшое количество масла, удерживаемого капиллярными силами. Масло служит в качестве гидравлического демпфера, гасящего собственные колебания кинематической системы датчика. При анодном напряжении 300 *в* и максимальном измеряемом ускорении максимальная амплитуда сигнала, снимаемого с подобного датчика, может быть порядка 15 *в*. Такие датчики сравнительно легко могут быть изготовлены силами почти любой лаборатории при наличии электронной лампы с внешним механическим управлением.

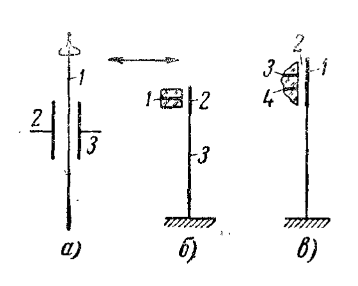
Высокая чувствительность датчиков ускорений позволила использовать их в измерительной и контрольной аппаратуре, причем в ряде случаев датчики работают непосредственно на регистрирующие и исполнительные устройства без дополнительного усиления сигналов, генерируемых датчиками.

В датчиках с внутренней инертной массой последняя находится внутри механически управляемой электронной лампы, являясь ее составной частью. Часто инертная масса является подвижным электродом механически управляемой электронной лампы. Схема расположения электродов механически управляемой лампы такого типа показана на фиг. 11,*б*. Внутри баллона электронной лампы находятся подогревный катод *1* и подвижные аноды *2*, укрепленные на эластичных опорах *3*. Под действием ускорения, направление которого показано стрелкой, подвижные аноды смещаются в положения, показанные пунктиром. При этом один из анодов приближается к катоду, в то время как второй анод удаляется от него. Датчик включается обычно в мостовую схему, образуя два плеча последней. Приборы этого типа обычно работают непосредственно на электромагнитный осциллограф, включаемый в диагональ моста.

Достоинствами датчиков ускорения с внутренней инертной массой являются простота и надежность конструкции, а также высокая надежность действия.

До последнего времени известным ограничением в использовании электронных датчиков с внутренней инертной массой была трудность демпфирования колебаний подвижного электрода, находящегося внутри вакуумного прибора. Эта трудность оказалась преодоленной в результате разработки метода демпфирования, сущность которого сводится к установке на корпусе эластично закрепленного датчика небольшого пружинного маятника, имеющего собственную частоту, равную резонансной частоте внутреннего подвижного электрода. Успешное решение задачи демпфирования датчика ускорений с внутренней инертной массой открыло перспективы более широкого использования моделей этих датчиков, имеющих улучшенные механические характеристики. Остановимся на двух направлениях решения задачи улучшения электронных датчиков ускорений с внутренней инертной массой.

Одно из них основано на использовании в качестве инертной массы облегченных электродов, позволяющих значительно повысить частоту собственных колебаний подвижного электрода. В частности, оказывается целесообразным использование в качестве подвижного электрода нитевидного катода датчика зондового управления. Схема датчика ускорений зондового управления электронного и газоразрядного показана на фиг. 12,*а*. Под действием ускорения, направление которого показано стрелкой, зонд *1* смещается относительно электродов *2* и *3*.



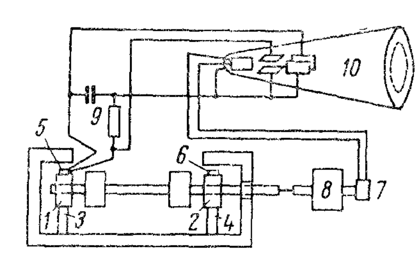
Фиг. 12. Схемы датчиков ускорений.

а — схема зондового датчика; *б* — схема газоразрядного датчика продольного управления; *в* — схема газоразрядного датчика поперечного управления.

Второе из упомянутых выше направлений основано на более широком использовании в качестве ионных датчиков ускорения с внутренней инертной массой других систем газоразрядных датчиков. На фиг. 12,*б* показана схема газоразрядного датчика продольного управления. В нем один электрод *1*, оплавленный стеклом, является неподвижным электродом. На конце он вместе с покрывающим его стеклом сошлифован на плоскость, перпендикулярную оси электрода. Второй электрод *2*, укрепленный на эластичном стержне *3*, играет роль внутренней инертной массы, смещающейся под действием ускорения в направлении, показанном стрелкой. На фиг. 12, *в* приведена схема газоразрядного датчика ускорений поперечного управления. Здесь пластина *1*, перемещаясь под действием ускорения, изменяет ширину щели *2*, по которой происходит разряд между электродами *3* и *4*.

Хорошие результаты дает применение электронных измерителей ускорения и в производственных условиях для полуавтоматического и автоматического контроля небаланса изделий. Использование их облегчило изготовление станков для автоматической балансировки вращающихся деталей на автоматической линии. На фиг. 13 показана схема балансировочной машины с электронными датчиками ускорений. Подшипники *1* и *2*, в которых вращается контролируемая деталь, укреплены на эластичных опорах *3* и *4*. Вращение детали сопровождается колебаниями подшипников и при-

крепленных к ним датчиков *5* и *6*. Фаза переменного тока, модулирующего анодный ток измерителя ускорений, определяется положением небаланса, а амплитуда переменного тока — величиной небаланса. Переменный ток отделяется от постоянной составляющей, фильтруется от помех, создаваемых шумами станка, и направляется в измерительное устройство одновременно с короткими импульсами, создаваемыми коммутатором *7*, соединенным с электродвигателем *8*, вращающим контролируемую деталь. Положение и величину небаланса удобно отсчитывать по экрану элекронного осциллографа *10*, включенного в схему фазоимпульсного индикатора. Переменная составляющая анодного тока датчика ускорения поступает на фазовращатель *9*, с которого переменные напряжения подаются на отклоняющие электроды электроннолучевой трубки, заставляя пучок электронов вращаться по окружности. Короткие импульсы напряжения, даваемые коммутатором *7*, используются для отпирания запертого пучка электронов осциллографа, дающего на экране светлое пятнышко в моменты замыкания контакта коммутатора. Расстояние пятнышка от центра шкалы определяет величину, а угол отклонения — положение небаланса.



Фиг. 13. Схема балансировочной машины.

Представляется небезинтересным указать еще одно возможное применение электронных датчиков ускорений — использование их для измерения и регистрации угловой скорости вращения. Для этого датчик ускорения крепится на вращающейся детали таким образом, чтобы он измерял центростремительное ускорение, пропорциональное квадрату угловой скорости. Относительно малая инерционность электронного датчика ускорений позволяет легко регистрировать при его помощи колебания угловой скорости вращающихся деталей, что оказывается особенно интересным, в частности, для регистрации крутильных колебаний, происходящих во вращающихся деталях машин и механизмов. Электронный датчик ускорений в устройствах такого типа может быть использован и для целей автоматического регулирования

режимов работы устройств в зависимости от значения угловой скорости контролируемой детали.

Устойчивость и надежность работы электронных датчиков ускорений позволяют использовать их для непосредственного контроля вибраций испытуемых изделий и машин в производственных условиях. Отсутствие необходимости в ряде случаев усиления сигналов, даваемых электронными датчиками, позволяет непосредственно включать большое количество одновременно работающих датчиков на многошлейфный электромагнитный осциллограф. Так, например, применение электронных датчиков позволило легко использовать 24-шлейфный осциллограф в цеховых условиях для одновременной записи ускорений и вибраций испытуемого механизма в 24 его точках.

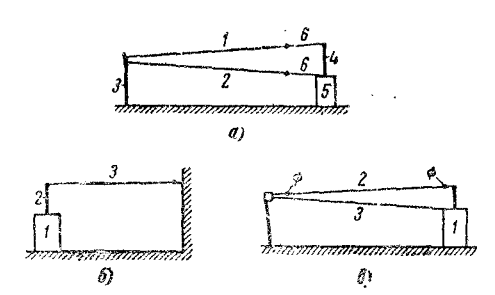
Электронные измерители немеханических величин

Опыт успешного применения электронных датчиков для измерения ряда механических величин способствовал увеличению интереса к использованию этих датчиков для измерения немеханических величин (в устройствах, позволяющих преобразовать измеряемую величину в перемещение подвижного электрода). Использование электронных датчиков в задачах подобного типа стимулируется их высокой чувствительностью и малой работой, затрачиваемой на механическое управление электронным током датчика, что позволяет осуществлять на основе использования механически управляемых электронных датчиков высокочувствительные измерители ряда физических величин.

Покажем некоторые способы применения электронных датчиков в тех измерительных устройствах, где использование этих датчиков позволяет существенно повысить чувствительность измерительных устройств к небольшим интенсивностям контролируемых процессов.

На фиг. 14, *а* показана схема электронного датчика температуры с проволочным воспринимателем, состоящим из двух проволок из различных металлов, например бронзовой *1* и вольфрамовой *2*. Первая из них соединяет натяжную пружину *3* с подвижным стержнем *4* электронного датчика малых перемещений *5*, а вторая — натяжную пружину с корпусом датчика. Такая кинематическая схема обеспечивает реакцию прибора только на изменение разности длин проволок, обусловленное изменением температуры воздуха, исключая при этом влияние на показания электронного термометра термических деформаций каркаса прибора. Участки *6* проволок *1* и *2*, находящиеся в непосредственной близости от датчика, желательно делать из одного металла для снижения влияния тепла электронной лампы на показания термометра.

Изготовляя обе проволоки *1* и *2* воспринимателя температуры из одного металла, мы получаем возможность измерять разность температур двух сред. Так, например, если одна из проволок покрыта увлажненной тряпочкой, то мы получаем устройство, позволяющее непосредственно



Фиг. 14. Схемы электронных датчиков немеханических величин.

а — электронный датчик температуры с проволочным воспринимателем; *б* — электронно-механический гигрометр; *в* — электронно-механический прибор для измерения токов высокой частоты.

отсчитывать психрометрическую разность (разность температур сухого и влажного термометров), т. е. получаем датчик чувствительного дистанционного психрометра.

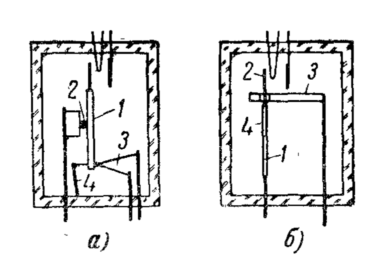
На фиг. 14,*б* показана схема электронно-механического гигрометра. Он состоит из электронного датчика малых перемещений *1*, к подвижному стержню *2* которого прикреплен обезжиренный волос *3*. Удлинение волоса, а следовательно, и показания гальванометра, включенного на выходе датчика, определяются влажностью воздуха.

Большая чувствительность электронного датчика к температуре деформируемого элемента позволяет осуществить высокочувствительные датчики ряда процессов, сопровождающихся выделением тепла. Такие датчики, например, можно применить для измерения токов высокой частоты и потоков света.

На фиг. 14,*в* показана схема прибора для измерения токов высокой частоты с электронным датчиком малых перемещений *1*, измеряющим деформацию проволоки *2*, нагре-

ваемой током. Другая проволока 3, изготовленная из того же металла, служит для температурной компенсации. Конструктивная схема этого устройства аналогична схеме описанного выше термометра.

Значительно бо́льшая чувствительность такого устройства может быть достигнута в случае расположения элемента, нагреваемого током, внутри баллона механически управляемой электронной лампы (фиг. 15,*а*). Здесь подвижной стержень *1* механически управляемой электронной лампы укреплен на крутильном подвесе *2*. Один конец стержня *1* соединен с проволокой *3*, нагреваемой измеряемым током, а на другом его конце укреплен подвижной электрод, управляющий анодным током лампы. Проволока *3* растягивается при помощи пружины *4*.



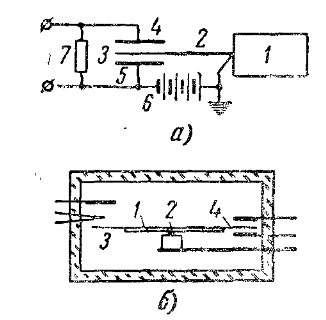
Фиг. 15. Устройство электронных датчиков немеханических величин.

а — датчик с внутренним воспринимателем измеряемого тока высокой частоты; *б* — электронно-механический прибор для измерения силы света с внутренним воспринимателем.

Простейшая конструктивная схема электронно-механического прибора для измерения интенсивности света аналогична схеме, изображенной на фиг. 14,*б*. В таком приборе вместо обезжиренного волоса *3* чувствительным элементом датчика служит зачерненная ленточка, на которую проектируется измеряемый поток света.

Другая схема прибора для измерения светового потока (с внутренним расположением воспринимателя) показана на фиг. 15,*б*. Здесь приемником измеряемого света служит пластинка *1*, состоящая из двух полосок одного металла, скрепленных на обоих концах. Один конец двойной пластинки укреплен на каркасе, а к другому свободному концу прикреплен управляющий электрод *2* механически управляемой электронной лампы. Сторона *4* пластинки *1* зачернена для лучшего поглощения падающего на нее света, который нагревает пластинку, вызывая ее изгиб, что сопровождается соответствующим смещением подвижного электрода механически управляемой электронной лампы. Экран *3* служит для предотвращения попадания на пластинку *1* света, излучаемого электродами лампы. Для того чтобы полностью использовать высокую чувствительность подобного устройства к слабым потокам света, целесообразно последний прерывать с частотой порядка нескольких герц. Работа с модулированным светом позволяет нейтрализовать вредное влияние неустойчивости нуля датчика, обусловленного нестабильностью теплового режима механически управляемой электронной лампы.

Следующим возможным применением механически управляемых электронных ламп являются устройства для измерения слабых токов. Здесь электронные датчики малых перемещений могут быть использованы в качестве датчиков электрометрического устройства.



Фиг. 16. Электронные датчики электрических величин.

а — схема электронного датчика для измерения слабых токов; *б* — устройство датчика для измерения слабых токов с внутренним воспринимателем.

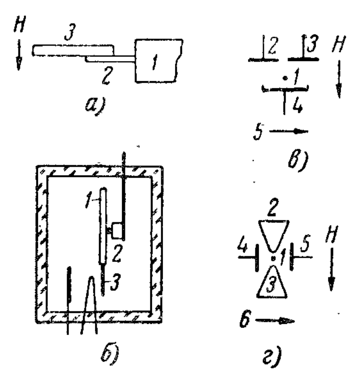
Принципиальная схема прибора подобного типа показана на фиг. 16,*а*. Он представляет собой электронный датчик малых перемещений *1*, на подвижном стержне *2* которого укреплен электрод *3* электрометрического устройства. Неподвижные электроды *4* и *5* электрометрического устройства соединены с одним, а подвижной электрод *3* с другим полюсом батареи *6*. Измеряемый ток проходит по сопротивлению *7*. При отсутствии тока электрод *3* занимает среднее положение, так как силы притяжения его к обоим электродам *4* и *5* уравновешивают друг друга. Когда же через сопротивление *7* течет измеряемый ток, падение напряжения на этом сопротивлении, складываясь с напряжением батареи *6*, изменяет соотношение сил, действующих на подвижной электрод электрометрического устройства. В результате этого стержень *2* с электродом *3* отклоняется на угол, пропорциональный измеряемому току.

На фиг. 16,*б* показано устройство аналогичного прибора, измерительный механизм которого размещен внутри баллона механически управляемой электронной лампы. Здесь стержень *1*, укрепленный на подвесе *2*, имеет на одном конце подвижной управляющий электрод *3* механически управляемой электронной лампы, а на другом конце — подвижную пластину *4* электрометрического устройства.

Применение механически управляемой электронной лампы, подвижной электрод которой сочленен с постоянным магнитом, находящимся в магнитном поле, может служить

для измерения интенсивности последнего, что позволяет осуществить простой дистанционный измеритель напряженности магнитного поля. Такое устройство отличается высокой чувствительностью и возможностью получения непрерывного отсчета показаний по шкале технического стрелочного микроамперметра. Рассмотрим несколько схем таких электронно-механических магнетометров.

Одна из них, приведенная на фиг. 17,*а*, состоит из электронного датчика малых перемещений *1*, на подвижном стержне *2* которого укреплен магнит *3*. Магнитное поле, направление которого показано стрелкой *H*, создает вращающий момент, отклоняющий стержень на угол, пропорциональный напряженности измеряемого поля. Датчик включается в мостовую схему, в диагонали которой находится гальванометр, отградуированный в единицах напряженности измеряемого магнитного поля.



Фиг. 17. Электронные датчики магнитных величин.

а — электронный датчик магнитометра с внешним магнитом; *б* — датчик электронного магнитометра с внутренним магнитом; *в* — схема электронного датчика магнитометра поперечного управления с подвижным катодом; *г* — схема электронного датчика магнитометра дифференциального управления с подвижным катодом.

Вместо постоянного магнита *3* в качестве воспринимающего элемента электронно-механического магнетометра целесообразно использовать катушку, по которой пропускается постоянный ток. Магнитное поле, в котором находится датчик, взаимодействуя с магнитным полем катушки, создает вращающий момент, отклоняющий подвижной стержень датчика и изменяющий благодаря этому анодный ток последнего. Используя в качестве подвижной системы механически управляемой электронной лампы подвижную систему магнитоэлектрического гальванометра, мы получим гальванометрический усилитель.

Располагая на конце подвижного стержня металлическое колечко или пластинку, можно получить датчик напряженности высокочастотного магнитного поля. Токи, индуктированные в колечке или пластинке, взаимодействуя с высокочастотным полем, создают усилие, отклоняющее подвижной стержень лампы.

На фиг. 17,*б* показано устройство датчика электронного магнетометра с внутренним магнитом. Здесь прямой магнит *1* укреплен на подвесе *2*. К концу магнита прикреплен электрод *3* механически управляемой электронной лампы.

Следует отметить еще один возможный вариант осуществления электронно-механического магнетометра, в котором подвижным элементом является нитевидный катод непосредственного накала. Схема одного из вариантов подобного устройства показана на фиг. 17,*в*. Это — датчик поперечного управления, в котором имеются тонкий катод непосредственного накала *1*, аноды *2* и *3*, а также холодный катод *4*. Направление магнитного поля показано стрелкой *H*. Под действием последнего катод *1* смещается в направлении, показанном стрелкой *5*. При постоянной величине тока накала катода его смещение оказывается пропорциональным напряженности магнитного поля. Следовательно, изменение распределения токов на аноды определяется напряженностью измеряемого магнитного поля.

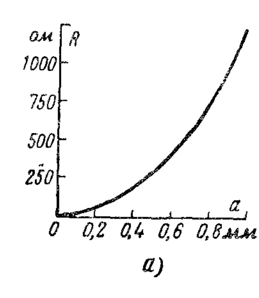
Схема другого варианта магнетометра с катодом непосредственного накала показана на фиг. 17,*г*. Он представляет собой электронную лампу дифференциального управления с тонким катодом непосредственного накала *1*, перемещающимся в щели, образованной половинами *2* и *3* холодного катода. По обе стороны щели находятся аноды *4* и *5*. Холодный катод целесообразно изготовить из ферромагнитного материала. Под действием магнитного поля, направление которого показано стрелкой *H*, катод *1* перемещается в направлении, показанном стрелкой *6*, следствием чего является изменение распределения электронных токов между анодами *4* и *5*.

Электронно-механические регуляторы

Возможность легкого регулирования режимов работы механически управляемых электронных и ионных ламп в результате небольших перемещений подвижного электрода позволяет использовать их для управления режимами маломощных выпрямителей и другой электронной и радиотехнической аппаратуры. Механически управляемые электронные лампы могут быть использованы в качестве регулируемых реостатов для цепей постоянного и переменного тока, а также в качестве кенотронов с регулируемым внутренним сопротивлением. Основными достоинствами электронных реостатов являются возможность значительных изменений

сопротивления при относительно небольших перемещениях подвижного элемента и отсутствие трущихся контактов. Опишем в качестве примера несколько вариантов подобных устройств и схем их использования.

Наиболее известным электронным реостатом является диод с плоскими параллельными электродами. Основными достоинствами являются сравнительно небольшое внутреннее сопротивление и значительный анодный ток. Внутреннее сопротивление такого диода постоянному току равно:



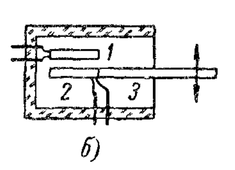
$$R = \frac{a^2}{A \cdot S \cdot U_a^{1/2}},$$

где a — расстояние между электродами, *см*;

$$A = 2{,}34 \cdot 10^{-6};$$

S — активная поверхность накаленного катода, *см*²;

U_a — падение напряжения на диоде.



Фиг. 18. Электронно-механический реостат.

а — характеристика зависимости сопротивления электронного реостата с плоскими параллельными электродами от расстояния между ними; *б* — устройство электронного реостата двусторонней проводимости.

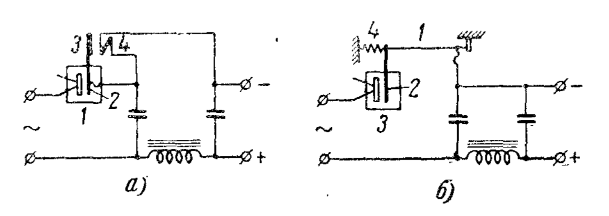
Как видно из этой формулы, внутреннее сопротивление электронного реостата быстро изменяется с изменением расстояния между его электродами.

На фиг. 18,*а* приведена характеристика зависимости внутреннего сопротивления R диодного реостата с плоскими параллельными электродами от расстояния a между ними при активной поверхности накаленного катода, равной 1 *см*², и при постоянном значении напряжения на реостате, равном 10 *в*.

Для регулирования цепей переменного тока могут быть применены диодные реостаты с двумя накаленными катодами, обладающие двусторонней проводимостью. Устройство такого реостата показано на фиг. 18,*б*. Здесь один подогревный катод *1*, неподвижный, а другой подогревный катод *2* укреплен на подвижном стержне *3* механически управляемой электронной лампы. При работе реостата в цепи переменного тока мощность, рассеиваемая внутри лампы, будет распределяться равномерно между ее электродами,

нагревая их примерно одинаково. Эта особенность электронных реостатов может быть использована для нагрева их катодов во время работы. В этом случае нагрев от внешнего источника тока необходим только для первоначального разогрева накаленного катода при включении реостата, а затем цепь накала может выключаться, так как подогрев катодов будет уже обеспечиваться мощностью, рассеиваемой внутри реостата. Такие приборы известны под названием саморазогревных электронных ламп.

Однокатодный электронно-механический реостат, обладающий односторонней проводимостью, представляет собой механически управляемый кенотрон с регулируемым вну-



Фиг. 19. Схемы автоматически регулируемых кенотронных выпрямителей.

а — схема стабилизации тока кенотронного выпрямителя; *б* — схема стабилизованного выпрямителя с тепловым восприимателем.

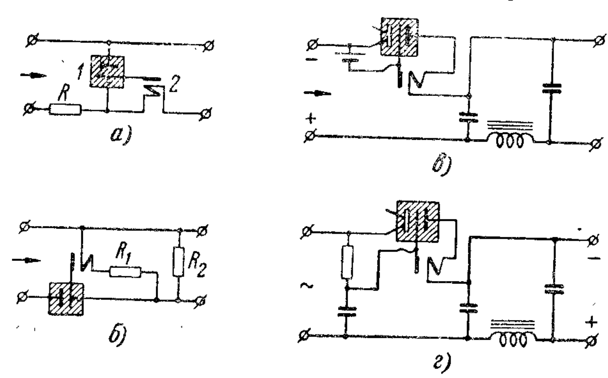
тренним сопротивлением. Изменение последнего в результате перемещения подвижного электрода, легко смещающегося под действием сравнительно небольших усилий, позволяет осуществлять простые системы автоматически регулируемых кенотронных выпрямителей, дающих стабилизованные ток или напряжение.

На фиг. 19,*а* показана схема стабилизованного однополупериодного выпрямителя с механически управляемым кенотроном *1*. Подвижной электрод *2* последнего механически соединен с якорем *3* электромагнита *4*, включенного последовательно в цепь постоянного тока выпрямителя. Подбирая соответственно эластичность системы и параметры электромагнита, можно стабилизовать ток на выходе выпрямителя.

На фиг. 19,*б* приведена схема стабилизатора, в котором стабилизуемый ток проходит по тонкой проволоке *1*, соединенной с подвижным стержнем *2* механически управляемого кенотрона *3*, оттягиваемым пружиной *4*. Увеличение тока в проволоке приводит к ее удлинению и соответствующему

повышению внутреннего сопротивления кенотрона, снижающего ток на выходе выпрямителя.

Существенным отличием двуханодного механически управляемого кенотрона от обычного двуханодного датчика электронного микрометра является расположение обоих анодов по одну сторону от накаленного катода. Это обусловлено необходимостью осуществлять одновременное перемещение обоих анодов выпрямителя (в процессе регулирования режима работы выпрямителя) в одном направлении. Для



Фиг. 20. Ионно-механические регуляторы.

а — схема стабилизации тока при помощи механически управляемой лампы тлеющего разряда; *б* — схема стабилизации напряжения при помощи механически управляемой лампы тлеющего разряда; *в* — схема тиратронного стабилизатора тока; *г* — схема выпрямителя с механически управляемым тиратроном.

стабилизации тока и напряжения могут использоваться также газоразрядные датчики. Рассмотрим несколько схем использования механически управляемых ламп для этой цели.

На фиг. 20,*а* показана схема использования газоразрядного датчика тлеющего разряда для стабилизации тока, питающего маломощное электронное устройство. Здесь механически управляемая лампа тлеющего разряда *1* включена последовательно с сопротивлением *R*. Подвижной электрод этой лампы соединен с якорем электромагнита *2*, включенного последовательно в выходную цепь регулирующего устройства. Снижение тока на выходе устройства будет сопровождаться сближением электродов газоразрядной лампы. В результате этого напряжение на ней будет возрастать, что в свою очередь приведет к увеличению тока на выходе регулятора.

Включая лампу тлеющего разряда последовательно в цепь регулятора, как это показано на фиг. 20,*б*, мы получаем возможность регулировать напряжение, снимаемое с сопротивления R_2 за счет изменения падения напряжения на газоразрядной лампе.

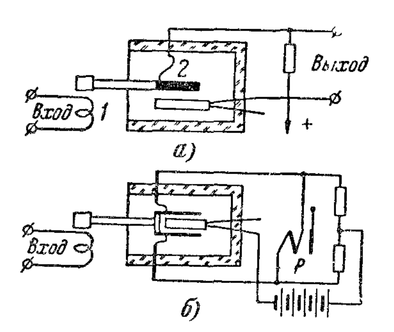
Значительно более мощные регулирующие устройства можно получить, используя для этого механически управляемые тиратроны.

На фиг. 20,*в* показана схема использования механически управляемого тиратрона в качестве импульсного регулятора в цепи постоянного тока выпрямителя. Частота зажиганий разряда в тиратроне при его работе задается много большей собственной частоты колебательного контура, образованного емкостями и индуктивностью фильтра. Средний ток на выходе регулирующего устройства оказывается прямо пропорциональным частоте зажиганий тиратрона, которая в свою очередь зависит от положения его подвижного электрода. Соединив механически последний с электромагнитом, включенным в выходную цепь устройства, мы можем стабилизовать ток, снимаемый с этого устройства.

На фиг. 20,*г* приведена схема выпрямителя с механически управляемым тиратроном в качестве вентиля. На сетку тиратрона подается переменное напряжение, сдвинутое по фазе относительно анодного напряжения. При постоянной величине угла сдвига фаз и постоянном отношении амплитуд анодного и сеточного напряжений фаза зажигания разряда в тиратроне оказывается функцией положения подвижного электрода. Так, увеличение коэффициента управления тиратрона уменьшает часть периода, в течение которой в тиратроне существует дуговой разряд. Наоборот, уменьшение коэффициента управления тиратрона приводит к увеличению части периода, в течение которой ток проходит сквозь тиратрон, а следовательно, соответственно возрастает ток, снимаемый с выпрямителя. Особенностью такого выпрямителя является простота регулирующего устройства, выгодно отличающая его от ряда аналогичных устройств, выполненных на обычных тиратронах.

Некоторый интерес представляет также возможность осуществления электронно-механического усилителя, в котором усиливаемый сигнал воздействует на кинематическую систему механически управляемой электронной лампы, приводя к смещению подвижного электрода лампы, пропорциональному значению этого сигнала. Перемещение подвижного электрода сопровождается в свою очередь пропорциональным изменением электронного тока лампы. Подбирая надлежащим образом параметры устройства, можно полу-

чать усиление сигналов, аналогичное усилению их обычной электронной лампой. Принципиальная схема подобного устройства показана на фиг. 21,*а*. Здесь усиливаемый сигнал подается в катушку электромагнита *1*, якорь которого механически соединен с подвижным электродом *2* механически управляемой электронной лампы. Перемещение якоря под действием сигнала сопровождается соответствующим изменением анодного тока лампы.



Фиг. 21. Электронно-механический усилитель.
а — схема усилителя; *б* — схема реле.

На фиг. 21,*б* приведена аналогичная схема релейного усилителя, в котором используется двуханодная механически управляемая электронная лампа. В диагональ мостовой схемы этой лампы включена электрическая цепь реле *Р*, для которого механически управляемая электронная лампа усиливает сигнал, управляющий работой реле. Инерционность подвижной системы механически управляемой электронной лампы оказывается не опасной для многих релейных схем, где не требуется значительное быстродействие.

К достоинствам описанного электронно-механического усилительного устройства можно отнести отсутствие прямой электрической связи между входной и выходной его цепями, так цепь усиливаемого сигнала и цепь усиленного тока разделены механической системой.

Итак, характерной особенностью электронно-механического усилителя является использование сочетания электромеханической системы, осуществляющей преобразование усиливаемого сигнала в перемещение подвижного электрода механически управляемой электронной лампы, и последней, дающей усиленный сигнал. В упомянутом выше устройстве такой системой оказывается электромагнит. Очевидна возможность применения в качестве подобного механизма и кинематической системы, аналогичной системе магнитоэлектрического реле и электромагнитной системы, идентичной механизму поляризованного реле, а также и некоторых других электромагнитных систем, позволяющих осуществить эффективное преобразование усиливаемого сигнала

в перемещение подвижного электрода механически управляемой электронной лампы.

Введем основные параметры электронно-механического усилителя (усиление по току, усиление по напряжению и крутизну) и дадим им следующее определение.

Под усилением по току будем понимать величину, равную

$$K_I = \frac{\Delta I_a}{\Delta I_0},$$

где ΔI_a — приращение анодного тока механически управляемой электронной лампы усилителя, обусловленное изменением тока ΔI_0 во входной цепи усилительного устройства.

Под усилением по напряжению будем понимать величину, равную

$$K_U = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_0},$$

где ΔU_a — приращение напряжения на аноде механически управляемой электронной лампы, обусловленное изменением напряжения ΔU_0, приложенного к входному электромеханическому устройству электронно-механического усилителя.

Наконец, под крутизной усилительного устройства будем понимать величину, равную

$$S_I = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_0}.$$

Вводя представление о чувствительности кинематической системы электронно-механического усилителя по току

$$\eta_I = \frac{\Delta l}{\Delta I_0}$$

и по напряжению

$$\eta_U = \frac{\Delta l}{\Delta U_0},$$

где Δl — смещение подвижного электрода механически управляемой электронной лампы, обусловленное приращениями тока ΔI_0 или напряжения ΔU_0 на входе усилительного устройства, мы получаем возможность выразить зависимость основных параметров этого устройства от параметров используемой усилительной лампы в форме:

$$K_I = \eta_I \cdot \psi,$$

$$K_U = \eta_U \cdot \varphi$$

и

$$S_I = \eta_U \cdot \psi.$$

Из приведенных соотношений видно, что при неизменной чувствительности механически управляемой электронной лампы усиление электронно-механического усилителя оказывается тем бо́льшим, чем выше значение электрических чувствительностей кинематической системы этого усилителя. А значения чувствительностей обычно возрастают с повышением гибкости кинематической системы. Отсюда следует, что помимо систем механически управляемых ламп внешнего управления оказывается также целесообразным использовать в электронно-механических усилителях и лампы внутреннего механического управления. В последних электромеханический преобразователь, осуществляющий преобразование усиливаемого сигнала в перемещение подвижного электрода, располагается внутри электронной лампы. Таким устройством является, например, электронная лампа, в которой в качестве подвижного элемента используется кинематическая система магнитоэлектрического или электромагнитного гальванометра или идентичное устройство.

Помимо описанных выше многочисленных применений механически управляемой электронной лампы, следует упомянуть также об опыте успешного использования ее в разнообразной физиологической и медицинской аппаратуре. В настоящее время на основе электронных датчиков механических величин осуществляется разнообразная аппаратура, применяемая для изучения особенностей кровообращения и дыхания. Многочисленные приборы такого типа успешно применяются и в клинической практике.